Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

Investigation of the Effect of Impurity Type and Amount on Heat Loss in the Sintering Process of Magnesite Ore

Research Article

Seyyed Mohsen Moosavi-Nezhad[1]

DOI: 10.22067/jmme.2025.92053.1185

1-Introduction

Magnesium oxide (MgO) is a vital material that is widely used in various industries including refractories, construction, pharmaceuticals and agriculture. Several methods are used to obtain high purity MgO, one of the most common of which is sintering using rotary kilns. The production of magnesium oxide from natural resources is often a complex process due to the presence of impurities in the ore, including oxides, silicates and carbonates, which can significantly affect the properties of the final product. These impurities are one of the important sources of heat loss in rotary kilns during magnesia production process. The aim of this research is to investigate the effect of type and amount of impurities of the magnesite ore from Sarbisheh mines on the amount of energy consumed in the calcination and sintering process in the rotary kiln. The studies carried out are purely through thermodynamic calculations with the help of Factsage 6.1 software. In this regard, a number of typical ores from the Sarbisheh region were selected and thermodynamic analyses of their heat consumption in the sintering process were investigated.

2- Research Method

FactSage 6.1 software and EQUILIB package have been used to perform thermodynamic calculations and calculate the enthalpy of the sintering process. The software is able to predict the final state of the system, which is a combination of the phases in it and the values of each phase. Also, the thermodynamic parameters of the final state of the system such as free energy changes, enthalpy, heat capacity, and volume can be provided by the software. In order to simulate the thermodynamic process of sintering, 100 grams of magnesite ore is selected as the input of the software, the initial temperature is 25℃ and the pressure is 1 atm. The final temperature of the system is considered as the temperature of the thermal process, and its pressure are selected as 1 atm in all cases. All pure solid, pure liquid, and gas compounds that are likely to form thermodynamically have been considered in the software calculations. A limited number of molten slags whose formation seemed kinetically and practically probable were also selected in the calculations. Other slags were removed from the software database to prevent excessive reduction in computing speed.

Thermodynamic studies have been carried out isothermally in the temperature range of 800-2000 ℃. The initial composition of the ore has been considered in a number of cases according to Table 1. Using the software outputs for all temperatures (temperatures have been selected with a step of 100 ℃), it is possible to obtain the curve of changes in the system variables as a function of temperature. By drawing these diagrams, it is possible to examine the effect of temperature on the change of phases and their values, as well as the formation of new phases. It is also possible to discuss on the start and end temperatures of some reactions and the formation of new compounds.

3- Results and Discussion

Figure 1 shows the enthalpy changes due to sintering of samples 1-4 (Table 1) as a function of temperature. As can be seen, increasing the ore purity from 85% (sample 1) to 100% (sample 4) was accompanied by a significant increase in the amount of heat consumed in the process. This stems from the fact that heating 1 g of magnesium oxide from ambient temperature to temperature T consumes more energy than heating 1 g of CaO or SiO_2 to the same temperature. The trend of enthalpy changes as a function of temperature is linear for all samples and does not change with temperature and magnesium purity. The slope of this graph is approximately 150 J/℃. This number means that if we want to increase the temperature of 100 g of ore by 1 ℃, we need 150 J energy. Of course, taking into account heat losses in industrial rotary kilns, more energy will be required.

*Manuscript received February 5, 2025, Revised April 18, 2025, Accepted June 27, 2025.

[1] Assistant professor, Department of Metallurgy and materials engineering, Faculty of Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran. **Email**: mohsenmoosavi@gonabad.ac.ir

Table 1: Mineralogical composition of different types of magnesite ore used in thermodynamic calculations.

Weight percentage of the ore compounds					
Sample number	MgO	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3
1	85	5.8	8	0.7	0.5
2	90	5.8	3	0.5	0.7
3	95	2.2	2.2	0.3	0.3
4	100	0	0	0	0
5	85	9.5	4.5	0.5	0.5
6	85	4.5	9.5	0.5	0.5

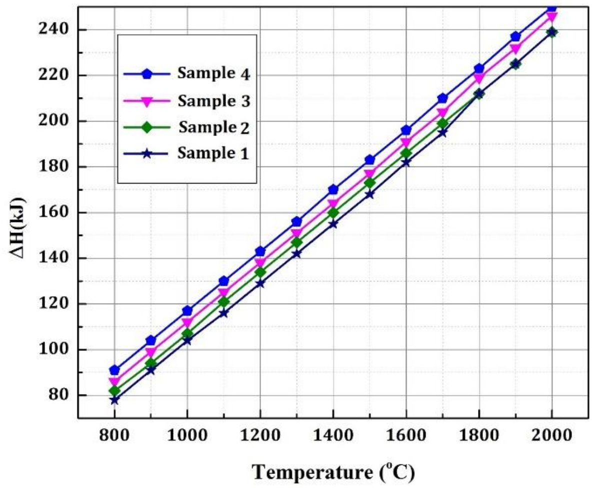


Figure 1: Enthalpy changes in different samples during sintering process as a function of temperature for 100 g of magnesite ore.

The study of equilibrium phases resulting from sample heating can be effective in analyzing the results. The results of thermodynamic studies show that part of the magnesium oxide of the ore reacts with aluminum, calcium and silicon oxides upon heating and produces solid compounds such as $MgO.Al_2O_3$, $CaO.MgO.SiO_2$, $MgO.3CaO.2SiO_2$, etc. The production of these phases causes heat consumption in the furnace. It is also possible to form the molten compound $SiO_2.2MgO$ at temperatures above 1700 °C. This compound is produced in larger quantities in samples with a higher percentage of silica. The formation of the molten phase increases heat losses in the furnace due to the consumption of latent heat of fusion.

4-Conclusion

In this study, the calcination and sintering process of different samples of magnesite ore with different amounts of impurities was thermodynamically simulated using FactSage 6.1 software. Studies show that the presence of impurities reduces the heat consumption in the furnace during the calcination and sintering processes. This fact is due to the lower heating enthalpy of impurities such as silica and lime compared to magnesia. An increase in the content of silica impurity in the ore leads to the formation of a pure $SiO_2.2MgO$ molten phase, which, by acquiring its latent heat of fusion from the furnace, causes heat losses. The relatively low weight values of impurities prevent the formation of slag molten phases during the sintering process. The best ore composition that has the lowest energy consumption in the sintering process and simultaneously produces the highest purity of magnesia, has a ratio of CaO/MgO = 1.8. The results of this research show that by controlling the relative amounts of some important impurities, energy consumption in pyrometallurgical processes can be reduced to some extent.

مهندسی متالورژی و مواد
https://jmme.um.ac.ir/
انجمن آهن و فولاد ایران
دانشگاه فردوسی مشهد

بررسی اثر نوع و میزان ناخالصی‌ها در تلفات حرارتی فرآیند تف‌جوشی سنگ معدن منیزیت*

مقاله پژوهشی

سید محسن موسوی نژاد[(۱)]

DOI: 10.22067/jmme.2025.92053.1185

چکیده در این مقاله اثر نوع ناخالصی و مقدار آن بر مصرف انرژی در کوره‌های تف‌جوشی منیزیا به کمک مدل‌سازی ترمودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی های ترمودینامیکی توسط نرم افزار FactSage 6.1 در بازه‌ی دمایی ۲۰۰۰-۸۰۰ °C فشار 1 atm و به صورت هم‌دما انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد، افزایش خلوص سنگ معدن با افزایش مصرف انرژی همراه است. به عنوان مثال در فرایند کلسیناسیون در دمای ۸۰۰ °C افزایش خلوص سنگ معدن از ۸۵٪ به ۱۰۰٪ باعث افزایش ۱۶ درصدی در مصرف انرژی می‌شود. این در حالیست که با افزایش دمای حرارت‌دهی به ۱۹۰۰ °C، همان میزان افزایش خلوص باعث افزایش ۷٪ انرژی مصرفی شده است. همچنین امکان تشکیل ترکیبات مذابی همچون $SiO_2.2MgO$ در مقادیر بالاتر ناخالصی اکسید سیلیسیم وجود دارد. این موضوع باعث اتلاف حرارتی بیشتر در فرایند تف‌جوشی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، در شرایطی که ناخالصی‌های اصلی سنگ معدن منیزیت، CaO,SiO_2 است، می‌توان با کنترل نسبت CaO/SiO_2 در حدود ۱٫۸، علاوه بر کاهش تلفات انرژی در کوره، مانع از تشکیل ترکیبات سیلیکات منیزیمی شده و خلوص MgO در محصول نهایی را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی سنگ معدن منیزیت، آنتالپی، اکسید کلسیم، اکسید سیلیسیم، تف‌جوشی.

Investigation of the Effect of Impurity Type and Amount on Heat Loss in the Sintering Process of Magnesite Ore

Seyyed Mohsen Moosavi-Nezhad

Abstract *This paper investigates the effect of impurity type and amount on energy consumption in magnesium sintering furnaces using thermodynamic calculations. Thermodynamic analyses were conducted using the FactSage 6.1 software within the temperature range of 800 to 2000 °C and at a pressure of 1 atm, under isothermal conditions. The results indicate that an increase in the purity of the ore is accompanied by an increase in energy consumption. For instance, in the calcination process at a temperature of 800 °C, increasing the ore purity from 85% to 100% leads to a 16% increase in energy consumption. Meanwhile, at a temperature of 1900°C, the same increase in purity caused a 7% rise in energy consumption. Additionally, the possibility of forming molten compounds such as SiO_2.2MgO exists at higher levels of silicon oxide impurities, which results in greater thermal losses during the sintering process. The results of this study show that when the main impurities in magnesite ore are CaO and SiO_2, controlling the CaO/SiO_2 ratio at around 1.8 can not only reduce energy losses in the furnace but also prevent the formation of magnesium silicate compounds and increase the purity of MgO in the final product.*

Keywords Magnesite Ore, Enthalpy, Calcium Oxide, Silicon Oxide, Sintering.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۱/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۴/۷ می‌باشد.

(۱) استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد.
Email: mohsenmoosavi@gonabad.ac.ir

مقدمه

اکسید منیزیم (MgO) یک ماده حیاتی است که به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله نسوزها، ساختمان، داروسازی، کشاورزی، کاتالیستی و تولید مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [1-5]. خواص استثنایی آن، مانند نقطه ذوب بالا، پایداری حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی، آن را در کاربردهای متعدد ضروری می‌کند [6,7]. برای به دست آوردن MgO با خلوص بالا، چندین روش استفاده می شود که یکی از رایج‌ترین آن‌ها، پخت با استفاده از کوره‌های دوار است [8]. این کوره ها در دماهای بالا کار می‌کنند و با مناطق حرارتی متمایز از جمله مناطق پیش‌گرمایش، پخت و خنک کننده مشخص می‌شوند که هر کدام نقش مهمی در تبدیل کربنات منیزیم به اکسید منیزیم با خلوص بالا دارند [9,10]. تولید اکسید منیزیم از منابع طبیعی اغلب به دلیل وجود ناخالصی‌های موجود در سنگ معدن، از جمله اکسیدها، سیلیکات‌ها و کربنات‌ها که می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر خواص محصول نهایی تأثیر گذارد، فرایندی پیچیده محسوب می‌شود [11].

ناخالصی‌ها از چند جهت بر مصرف انرژی در کوره‌های دوار اثر می‌گذارند. یکی از این موارد تاثیر بر رسانایی حرارتی سنگ معدن است. به عنوان مثال مقدار بالاتر ترکیبات سیلیکاتی، رسانایی حرارتی را کاهش داده و منجر به غیریکنواختی دمایی در بستر مواد می‌شود [12]. این مساله حرارت مورد نیاز برای رسیدن به دمای تف‌جوشی را افزایش داده و موجب تلفات حرارتی می‌شود. همچنین ناخالصی‌ها می توانند دمای ذوب و واکنش مواد در داخل کوره را دستخوش تغییر کنند. به عنوان مثال وجود اکسیدهای آهن منجر به شکل‌گیری فازهای مذاب در دماهای پایین شده که بخشی از انرژی ورودی کوره را در قالب گرمای نهان ذوب مصرف می‌کنند [13]. ظرفیت حرارتی ترکیب سنگ معدن نیز می‌تواند تحت تاثیر نوع ناخالصی قرار گیرد. ظرفیت حرارتی بالاتر به معنای مصرف انرژی بیشتر جهت گرم شدن تا دمای کوره و متعاقبا افزایش تلفات حرارتی است. ناخالصی از طریق تولید محصولات جانبی نیز می‌تواند بر تلفات حرارتی تاثیر گذار باشد [13]. به عنوان مثال حضور کلسیم می‌تواند باعث تشکیل سیلیکات‌های کلسیم شود که برای تجزیه شدن، انرژی مصرف کرده و تلفات حرارتی را افزایش می دهند [14]. لذا می‌توان گفت یکی از منابع مهم تلفات حرارتی در کوره‌های دوار تولید منیزیا، ناخالصی‌های موجود در سنگ معدن است.

ناکارآمدی‌های حرارتی در کوره های دوار نه تنها بر مصرف انرژی کلی فرآیند تولید تأثیر می‌گذارد، بلکه منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی و اثرات زیست محیطی می‌شود. درک و تعیین کمیت تلفات حرارتی در کوره‌های پخت منیزیم، برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش کارایی فرآیند ضروری است. همانطور که صنایع به طور فزاینده‌ای به دنبال پایداری و مقرون به صرفه بودن هستند، بهبود مدیریت حرارتی کوره‌های دوار به عنوان یک پارامتر حیاتی برای پیشبرد تولید اکسید منیزیم ضروری است [15-20].

مهم‌ترین معادن منیزیت در ایران در استان های خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان و یزد قرار دارد. در این میان معدن منیزیت سربیشه در استان خراسان جنوبی به دلیل حجم زیاد و همچنین خلوص و کیفیت بالای اکسید منیزیم آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سنگ معدن موجود در معادن این منطقه در خلوص های ۹۸-۷۰٪ از اکسید منیزیم یافت می‌شود. ناخالصی‌های اصلی این سنگ معدن شامل $CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3$ می‌شود [11,12]. سیلیس و آهک در مقایسه با آلومینا و هماتیت از درصدهای وزنی بالاتری برخوردارند. هدف این تحقیق بررسی نوع و میزان ناخالصی سنگ معدن منیزیت معادن سربیشه، بر میزان انرژی مصرفی در فرایند کلسیناسیون و تف-جوشی در کوره‌ی دوار است. بررسی‌های انجام شده صرفا از طریق محاسبات ترمودینامیکی و به کمک نرم افزار Factsage 6.1 می‌باشد. در همین راستا تعدادی از سنگ های معدن تیپیکال منطقه سربیشه انتخاب شده و تحلیل های ترمودینامیکی پیرامون میزان گرمای مصرفی آنها در فرایند تف‌جوشی بررسی شده است. محاسبات ترمودینامیکی بر حسب دما و نوع ناخالصی انجام شده است و نتایج به دست آمده تاثیر نوع ناخالصی بر میزان گرمای مصرفی کوره را نشان می‌دهد.

روش تحقیق

از نرم افزار FactSage 6.1 و پکیج EQUILIB که یکی از پکیج های محاسباتی نرم افزار محسوب می‌شود، جهت انجام محاسبات ترمودینامیکی و محاسبه‌ی آنتالپی فرایند تفجوشی استفاده شده است. این بسته نرم افزاری یک سیستم ترمودینامیکی را به عنوان

ورودی از کاربر دریافت می‌کند. پارامترهای اساسی سیستم شامل ترکیب شیمیایی فازهای آن، مقدار هر فاز، حالت هر فاز، دمای آن و فشار حاکم بر سیستم و ... توسط کاربر تعریف می‌شود. نرم افزار دارای یک پایگاه داده بسیار قوی از انرژی آزاد، آنتالپی، آنتروپی و دیگر پارامترهای ترمودینامیکی برای تعداد کثیری از واکنش ها و مواد می‌باشد. لذا قادر است با تقریب بالایی تمامی واکنش‌های محتمل میان فازهای موجود در سیستم را پیش‌بینی نموده و تغییرات انرژی آزاد در اثر این واکنش‌ها را مورد بررسی قرار دهد. با تغییر پارامترهای اساسی سیستم مثل دما یا فشار، نرم افزار مجددا بررسی های ترمودینامیکی خود را انجام داده و تمامی واکنش‌های احتمالی میان فازها را پیش‌بینی و محاسبات را انجام می‌دهد. حالت نهایی سیستم، حالتی است که فازهای آن کم‌ترین میزان انرژی آزاد را در مقایسه با حالات ممکن دیگر ایجاد کرده باشند. نرم افزار قادر است حالت نهایی سیستم را که ترکیبی از فازهای موجود در آن و مقادیر هر فاز است را به کاربر ارایه نماید. همچنین پارامترهای ترمودینامیکی حالت نهایی سیستم مانند تغییرات انرژی آزاد، آنتالپی، ظرفیت گرمایی، حجم نیز توسط نرم افزار قابل ارایه است. به منظور کاهش حجم محاسبات می‌توان فازهایی که از نظر سینتیکی احتمال تولید آنها صفر محسوب می‌شود را در نرم افزار مشخص نمود تا نرم افزار در محاسبات خود آن‌ها را نادیده بگیرد. این مساله علاوه بر افزایش سرعت محاسبات، باعث نزدیک شدن نتایج خروجی نرم افزار به نتایج واقعی (آزمایشگاهی یا صنعتی) می شود.

گام اول در استفاده از EQUILIB، تعیین حالت اولیه‌ی سیستم ترمودینامیکی مورد نظر است. به همین منظور مقدار ۱۰۰ گرم از سنگ معدن منیزیت به عنوان ورودی نرم افزار انتخاب شده، دمای اولیه ° ۲۵ و فشار atm ۱ انتخاب می‌شود. دمای نهایی سیستم، دمای فرایند حرارتی و فشار آن در تمامی حالات atm ۱ انتخاب می‌شود. تمامی ترکیبات جامد خالص، مایع خالص و گاز که احتمال تشکیل آن‌ها از نظر ترمودینامیکی وجود دارد در محاسبات نرم افزار مد نظر قرار گرفته است. تعداد محدودی از سرباره‌های مذاب که تشکیل آن‌ها از نظر سینتیکی و عملی محتمل به نظر می‌رسید نیز در محاسبات انتخاب شدند. دیگر سرباره‌ها از پایگاه داده‌ی نرم‌افزار حذف گردید تا از کاهش بیش از حد سرعت محاسبات جلوگیری شود.

بررسی های ترمودینامیکی در بازه دمایی °۲۰۰۰-۸۰۰ به صورت هم‌دما انجام شده است. ترکیب اولیه سنگ معدن در ۲۱ حالت مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است. ترکیبات ارایه شده در جدول (۱)، نمونه‌هایی از ترکیبات سنگ های معدنی استخراج شده از معادن سفیدکوه، چاه خو و ترشک محمدی از معادن سربیشه واقع در خراسان جنوبی می‌باشد. نمونه‌ای از صفحه‌ی نتایج نرم‌افزار FactSage (مربوط به نمونه‌ی ۱ در دمای ° ۱۹۰۰) در جدول (۲) به نمایش گذاشته شده است. با داشتن این نتایج برای تمامی دماها (دماها با گام °۱۰۰ انتخاب شده‌اند) می‌توان منحنی تغییرات متغیرهای سیستم را بر حسب دما رسم نمود. با رسم این نمودارها، می‌توان اثر تغییر دمای فرایند را بر تغییر فازها و مقادیر آن‌ها و همچنین تشکیل فازهای جدید بررسی نمود. همچنین می‌توان در مورد دمای شروع و پایان برخی واکنش‌ها و تشکیل ترکیبات جدید اظهار نظر نمود.

جدول ۱ ترکیب معدنی نمونه های مختلف سنگ معدن منیزیت، مورد بررسی در محاسبات ترمودینامیکی

شماره نمونه	درصد وزنی ترکیب در سنگ معدن				
	MgO	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3
۱	۸۵	۵٫۸	۸	۰٫۷	۰٫۵
۲	۹۰	۵٫۸	۳	۰٫۵	۷.۰
۳	۹۵	۲٫۲	۲٫۲	۰٫۳	۰٫۳
۴	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
۵	۸۵	۹٫۵	۴٫۵	۰٫۵	۰٫۵
۶	۸۵	۴٫۵	۹٫۵	۰٫۵	۰٫۵
۷	۸۵	۰	۱۴	۰٫۵	۰٫۵
۸	۸۵	۱	۱۳	۰٫۵	۰٫۵
۹	۸۵	۲	۱۲	۰٫۵	۰٫۵
۱۰	۸۵	۳	۱۱	۰٫۵	۰٫۵
۱۱	۸۵	۴	۱۰	۰٫۵	۰٫۵
۱۲	۸۵	۵	۹	۰٫۵	۰٫۵
۱۳	۸۵	۶	۸	۰٫۵	۰٫۵
۱۴	۸۵	۷	۷	۰٫۵	۰٫۵
۱۵	۸۵	۸	۶	۰٫۵	۰٫۵
۱۶	۸۵	۹	۵	۰٫۵	۰٫۵
۱۷	۸۵	۱۰	۴	۰٫۵	۰٫۵
۱۸	۸۵	۱۱	۳	۰٫۵	۰٫۵
۱۹	۸۵	۱۲	۲	۰٫۵	۰٫۵
۲۰	۸۵	۱۳	۱	۰٫۵	۰٫۵
۲۱	۸۵	۱۴	۰	۰٫۵	۰٫۵

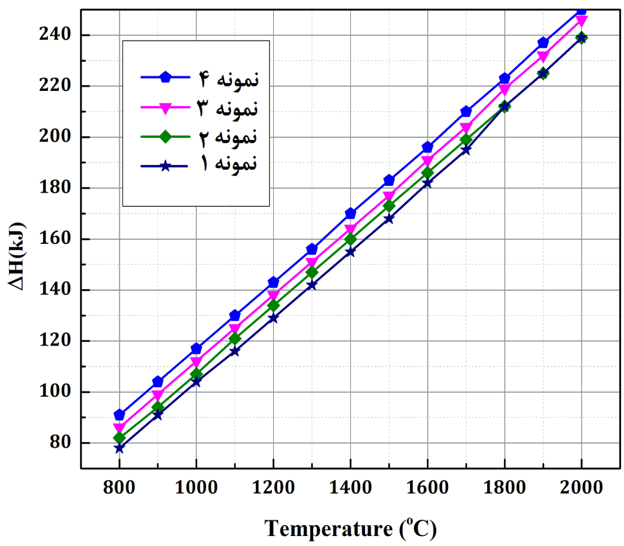
جدول ۲ نمونه ای از نتایج به دست آمده از بسته EQUILIB مربوط به نمونه ۱ در دمای حرارت دهی ۱۹۰۰°

EQUILIB input data and conditions				
T = 1900.00 C				
P = 1.00000E+00 atm				
V = 1.30428E-01 dm3				
STREAM CONSTITUENTS	AMOUNT/gram	TEMPERATURE/C	PRESSURE/atm	STREAM
MgO_periclase(s)	8.50E+01	25	1.00E+00	1
CaO_lime(s)	5.80E+00	25	1.00E+00	1
SiO2_quartz(l)(s)	8.00E+00	25	1.00E+00	1
Fe2O3_hematite(s)	7.00E-01	25	1.00E+00	1
Al2O3_gamma(s)	5.00E-01	25	1.00E+00	1
EQUILIB output data				
	gram	TEMPERATURE/C	ACTIVITY	
MgO_periclase(s)	7.82E+01	1900	1.00E+00	
MgOCa3O3Si2O4_merwini(s)	1.13E+01	1900	1.00E+00	
Mg2SiO4_liquid(liq)	9.03E+00	1900	1.00E+00	
MgAl2O4_spinel(s)	6.98E-01	1900	1.00E+00	
Fe3O4_liquid(liq)	6.77E-01	1900	1.00E+00	
DELTA_Cp	DELTA_H	DELTA_S	DELTA_G	DELTA_V
J.K-1	J	J.K-1	J	dm3
4.49E+01	2.26E+05	2.38E+02	-4.16E+05	1.30E-01

نتایج و بحث

شکل (۱)، تغییرات آنتالپی در اثر تف‌جوشی نمونه‌های ۴-۱ (جدول۱) بر حسب دما را به نمایش گذاشته است. همانطور که مشاهده می شود افزایش خلوص سنگ معدن از ۸۵٪ (نمونه‌ی ۱) به ۱۰۰٪ (نمونه‌ی ۴) با افزایش قابل توجهی در میزان گرمای مصرفی فرایند همراه بوده است. این مساله از این حقیقت نشات می‌گیرد که گرمایش ۱ گرم اکسید منیزیم از دمای محیط تا دمای T، انرژی بیشتری در مقایسه با گرمایش ۱ گرم CaO یا SiO_2 تا همان دما، مصرف می‌کند. جدول (۳) که در همین رابطه رسم شده است مقادیر تغییر آنتالپی برای اکسیدهای منیزیم، سیلیسیم و کلسیم را بر حسب دما گزارش کرده است. بیشترین مقدار آنتالپی در هر دما متعلق به اکسید منیزیم می‌باشد. از آنجاکه درصد اندکی از سنگ معدن را ناخالصی‌های آلومینایی و هماتیتی تشکیل می‌دهند، حضور آن‌ها تاثیر محسوسی بر میزان گرمای مورد نیاز فرایند حرارتی در کوره ندارد.

روند تغییرات آنتالپی بر حسب دما، برای تمامی نمونه‌ها روندی خطی بوده و با تغییر دما و درصد خلوص منیزیم تغییری نمی‌کند. شیب این نمودار تقریبا معادل ۱۵۰ J/°C است. این عدد به این معناست که اگر بخواهیم دمای ۱۰۰ گرم از سنگ معدن را یک درجه سانتی گراد افزایش دهیم نیاز به ۱۵۰ J انرژی حرارتی داریم. البته با در نظر گرفتن تلفات حرارتی در کوره‌های دوار صنعتی مقادیر بیشتری انرژی مورد نیاز خواهد بود.

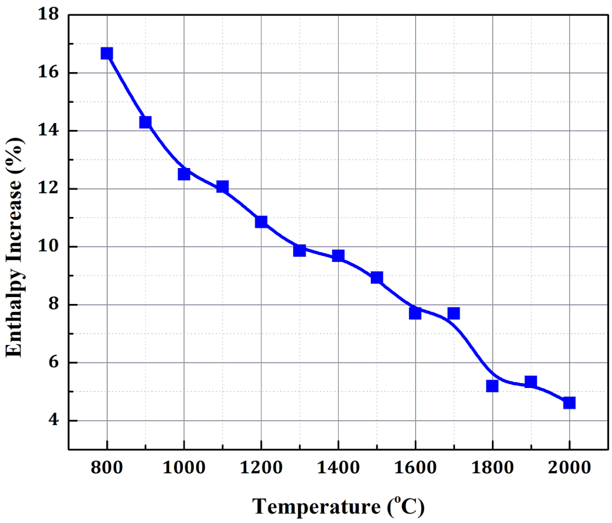


شکل ۱ تغییرات آنتالپی در اثر فرایند تفجوشی نمونه های مختلف بر حسب دما برای ۱۰۰ گرم سنگ معدن منیزیت

جدول ۳ انرژی مورد نیاز (بر حسب ژول) برای گرم کردن یک گرم از ترکیب اکسیدی از دمای محیط تا دما کوره (T)

SiO_2	CaO	MgO	T(℃)
۸۴۲	۶۹۹	۹۱۱	۸۰۰
۱۱۱۴	۸۹۲	۱۱۶۹	۱۰۰۰
۱۳۵۶	۱۰۸۶	۱۴۳۱	۱۲۰۰
۱۵۹۹	۱۲۸۲	۱۶۹۶	۱۴۰۰
۱۸۴۷	۱۴۷۹	۱۹۶۳	۱۶۰۰
۲۲۲۰	۱۶۷۷	۲۲۳۲	۱۸۰۰
۲۵۰۱	۱۸۷۶	۲۵۰۳	۲۰۰۰

برای درک بهتر این افزایش، در شکل (۲) درصد افزایش آنتالپی فرایند با افزایش خلوص از ۸۵٪ به ۱۰۰٪ بر حسب دما به نمایش گذاشته شده است. درصدها به صورت وزنی درنظر گرفته شده است. بر اساس این شکل در فرایند کلسیناسیون سنگ معدن (حرارت دهی در دماهای ۸۰۰°–۱۰۰۰) ، با افزایش خلوص منیزیا از ۸۵٪ به ۱۰۰٪ به طور متوسط ۱۴٪ انرژی بیشتر برای گرم کردن مواد نیاز است. اما برای فرایند تف‌جوشی این افزایش خلوص، به طور متوسط با ۷٪ افزایش انرژی حرارتی همراه است.

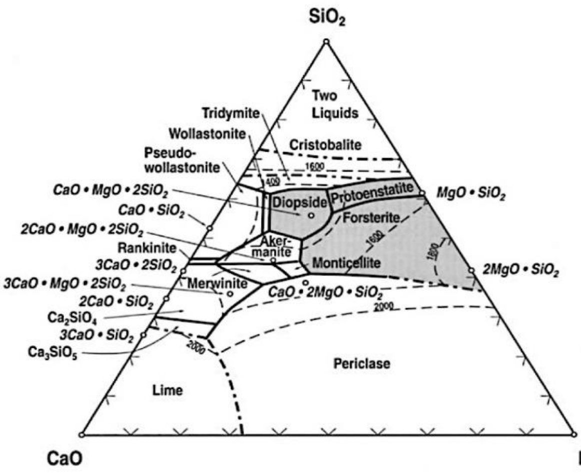


شکل ۲ درصد افزایش آنتالپی بر حسب دما برای افزایش خلوص منیزیا از ۸۵٪ به ۱۰۰٪.

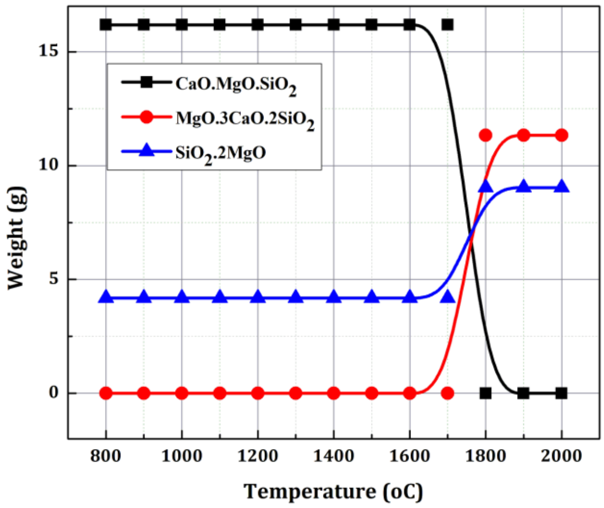
بررسی فازهای تعادلی ناشی از حرارت‌دهی نمونه می‌تواند در تحلیل نتایج اثر بخش باشد. نتایج بررسی‌های ترمودینامیکی نشان می‌دهد بخشی از اکسید منیزیم سنگ معدن در اثر حرارت دهی با اکسیدهای آلومینیوم، کلسیم و سیلیسیم وارد واکنش شده و ترکیبات جامدی نظیر $MgO.Al_2O_3$, $CaO.MgO.SiO_2$, $MgO.3CaO.2SiO_2$, را تولید کند. شکل (۳)، دیاگرام فازی سه تایی CaO,MgO,SiO_2 را نشان می‌دهد [22]. فازهای مروینیت ($MgO.3CaO.2SiO_2$) و همچنین مانتیسلایت ($CaO.MgO.SiO_2$) در این شکل قابل مشاهده هستند. همچنین امکان تشکیل ترکیب مذاب $SiO_2.2MgO$ در دماهای بالاتر از ۱۸۰۰° وجود دارد. این ترکیب بر روی خط $MgO-SiO_2$ در نقطه‌ای در نزدیکی ۶۰٪ وزنی منیزیا قرار دارد. این ترکیب در دماهای پایین تشکیل شده و با افزایش دما به بالاتر از ° ۱۸۰۰ ذوب می شود. هر چند تشکیل ترکیب فورستریت جامد توسط برخی محققین در دماهای □ ۹۰۰ نیز گزارش شده است اما در فرایندهای صنعتی عموما به دمای بالاتر از □ ۱۱۰۰ برای تولید این ترکیب نیاز داریم [23,24]. این ترکیب در نمونه هایی که درصد سیلیس آن بیشتر است، به مقدار بیشتری تولید می شود. در همین رابطه بررسی منحنی آنتالپی نمونه (۱) در شکل (۱) (خط آبی، مارکر ستاره) حاکی از یک جهش در میزان آنتالپی نمونه در دمای □ ۱۸۰۰ است. این افزایش انرژی در اثر واکنش زیر که یک واکنش گرماگیر است رخ می دهد:

$$3\,CaO.MgO.SiO_2(s) \rightarrow MgO.3CaO.2SiO_2(s) + SiO_2.2MgO\ (l) \quad (۱)$$

آنتالپی واکنش (۱) معادل ۱۰۹ kJ/mol در دمای □ ۱۸۰۰ است و بخش اصلی این گرما به گرمای نهان ذوب ترکیب $SiO_2.2MgO$ اختصاص دارد. شکل (۴)، تغییرات درصد وزنی ترکیبات موجود در واکنش (۱) را بر حسب دما نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با تغییر دما از۱۷۰۰° به ° ۱۸۰۰ به یکباره مقدار وزنی ترکیب $CaO.MgO.SiO_2$ از حدود ۱۶ گرم به صفر می رسد. متعاقبا مقدار فاز $MgO.3CaO.2SiO_2$ از صفر به حدود ۱۱ گرم و مقدار فاز $SiO_2.2MgO$ از ۴ گرم به ۹ گرم افزایش یافته است. این تغییرات وزنی موید بر انجام واکنش (۱) در نمونه ۱ در بازه‌ی دمایی ۱۷۰۰°–۱۸۰۰ است.



شکل ۳ دیاگرام فازی سه تایی سیستم $CaO\text{-}MgO\text{-}SiO_2$ [22]



شکل ۴ نمودار تغییر مقادیر وزنی ترکیبات اکسیدی شرکت کننده در واکنش (۱) بر حسب دمای تفجوشی

مقایسه آنتالپی فرایند حرارت دهی برای نمونه های ۶-۵ که با دارا بودن خلوص یکسان از منیزیا، دارای نسبت‌های مختلفی از اکسیدهای کلسیم و سیلیسیم هستند می‌تواند اطلاعات مفیدی را در رابطه با اثر نوع ناخالصی بر میزان مصرف انرژی در کوره را فراهم آورد. شکل (۵)، تغییرات آنتالپی برای حرارت‌دهی نمونه‌های (۵-۶) بر حسب دما را به نمایش گذاشته است. از این شکل نکات زیر قابل استخراج است:

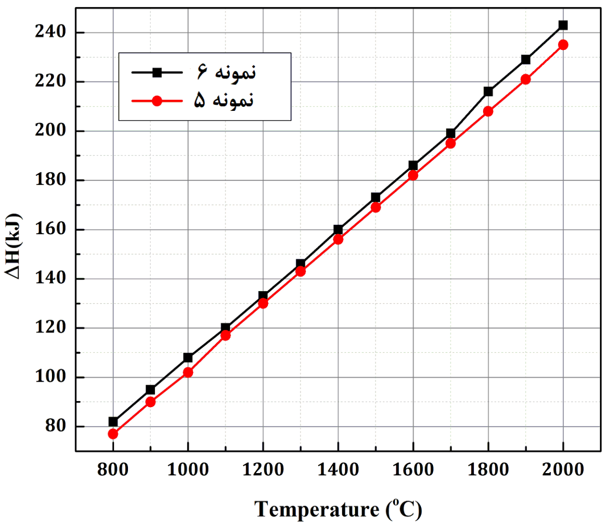
۱. نمونه ۶ که ناخالصی سیلیسی بیشتری دارد، گرمای بیشتری مصرف کرده است. این موضوع ناشی از آنتالپی بالاتر گرمایش برای ۱ گرم اکسید سیلیسیم از دمای محیط تا دمای تف‌جوشی نسبت به مقدار مشابه برای اکسید کلسیم است.

۲. در دمای ۱۸۰۰° تشکیل فاز مذاب $SiO_2.2MgO$ (در نمونه ۶)، باعث مصرف بیشتر گرما در فرایند تف‌جوشی شده و این مساله خود را به شکل تغییر شیب در منحنی آنتالپی نشان داده است.

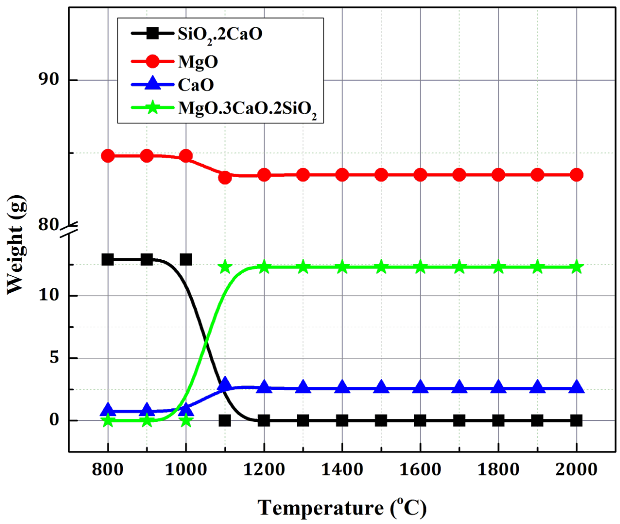
۳. در دمای ۱۱۰۰° واکنش زیر که یک واکنش گرماگیر است در نمونه (۵) رخ داده و باعث افزایش مصرف حرارت در این سنگ معدن شده است. آنتالپی این واکنش در دمای ۱۱۰۰ ° معادل ۴۶ kJ/mol است.

$$2\,SiO_2.2CaO(s) + MgO\,(s) \rightarrow MgO.3CaO.2SiO_2(s) + CaO\,(s) \quad (2)$$

تغییرات وزنی ترکیبات موجود در واکنش (۲) در شکل (۶) به نمایش گذاشته شده است. مقدار وزنی $SiO_2.2CaO$ پس از عبور از دمای ۱۰۰۰° به صفر گرم رسیده است. هم‌زمان مقدار وزنی فازهای $MgO.3CaO.2SiO_2$ و CaO با افزایش روبرو شده است. این تغییرات حاکی از آن است که واکنش (۱) در بازه دمایی ۱۰۰۰-۱۱۰۰ ° به وقوع پیوسته است. با افزایش بیشتر دما مقادیر این فازها تغییر نکرده است. لذا افزایش آنتالپی نشان داده شده برای دماهای بالاتر از ۱۱۰۰ °C در شکل (۴)، مربوط به انرژی لازم برای افزایش دمای فازهای موجود است و صرف انجام واکنش جدیدی نشده است.

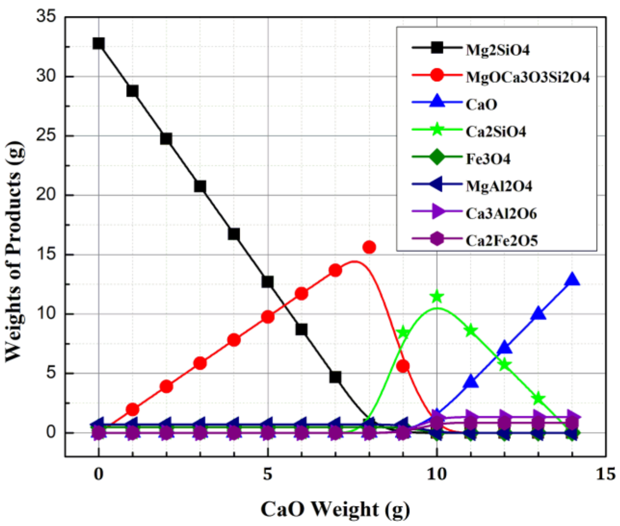


شکل ۵ تغییر آنتالپی در اثر حرارت دهی سنگ معدن منیزیا بر حسب دما برای نمونه های ۶-۵

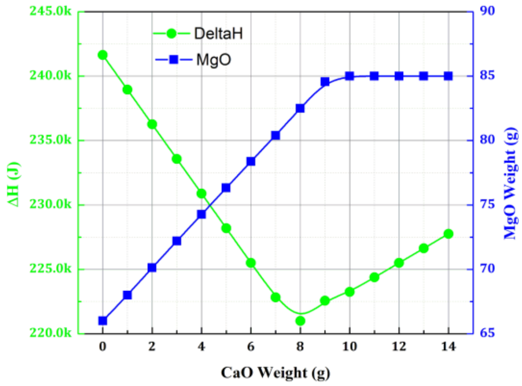


شکل ۶ نمودار تغییر مقادیر وزنی ترکیبات اکسیدی شرکت کننده در واکنش (۲) بر حسب دمای تف‌جوشی

ترکیب‌های ۲۱-۷ در جدول (۱) به منظور بررسی اثر نسبت $CaO:SiO_2$ در سنگ معدن منیزیت بر روی مصرف انرژی فرایند تف‌جوشی و همچنین فازهای تشکیل شده در حین فرایند، مورد بررسی ترمودینامیکی قرار گرفتند. خلوص MgO در تمامی نمونه ها ثابت و ۸۵٪ در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار ناخالصی های هماتیتی و آلومینا ثابت و هر کدام ۰٫۵ درصد وزنی در نظر گرفته شده است. در نمونه ۷ مقدار سیلیس ۱۴٪ وزنی و مقدار آهک صفر است. با افزایش شماره‌ی نمونه، مقدار سیلیس کاهش یافته و بر مقدار آهک افزوده می شود. شکل (۷) مقادیر وزنی محصولات فرایند تف‌جوشی سنگ معدن منیزیت تا دمای ۱۹۰۰° بر حسب درصد وزنی CaO را نشان می دهد. در نمونه (۷) که فاقد آهک است و بیشترین مقدار سیلیس (۱۴٪) را دارد، فاز فورستریت با ترکیب $2MgO.SiO_2$ به میزان ۳۳٪ تشکیل شده است. فاز فورستریت خواص دیرگدازی مناسبی دارد و همراه با مگنتیت تنها فازهای مذاب در آن دما محسوب می‌شوند [25]. با افزایش CaO و کاهش SiO_2 در سنگ معدن، از مقدار فاز فورستریت کاسته شده و فاز $MgO.3CaO.2SiO_2$ تشکیل می شود. تشکیل این فاز به صورت همدما و از ترکیبات اکسیدی خالص، فرایندی گرمازاست و می تواند بخشی از گرمای لازم برای ذوب فورستریت را تامین نماید. هر چه درصد آهک افزایش یابد مقدار فاز بالا افزایش یافته و مقدار فورستریت کاهش یابد. این مساله باعث کاهش انرژی لازم برای فرایند تف‌جوشی است. بیشترین مقدار فاز $MgO.3CaO.2SiO_2$ در مقدار ۸٪ وزنی آهک به دست می آید و مقدار این ترکیب در این حالت ۱۵٫۶٪ وزنی است. در این ترکیب مصرف انرژی به کمترین مقدار خود می‌رسد (شکل ۸ را ببینید). با افزایش CaO به ۹٪ فاز فوق تجزیه شده و فاز $2CaO.SiO_2$ تشکیل می شود. از آن‌جاکه تجزیه فاز فوق گرماگیر است، باعث افزایش آنتالپی فرایند شده است. با افزایش مقدار آهک به مقادیر بالاتر (کاهش بیشتر سیلیس)، فاز $2CaO.SiO_2$ به تدریج شروع به تجزیه می‌کند و از آنجاکه این فرایند نیز گرماگیر است باعث افزایش آنتالپی سیستم می شود. همچنین در مقادیر بالای ۱۰٪ آهک، CaO آزاد با اکسیدهای آهن و آلومینیوم وارد واکنش شده و فازهای $2CaO.Fe_2O_3$, $3CaOAl_2O_3$ تشکیل می‌شوند. مقادیر بیشتر CaO نیز بدون آنکه با MgO خالص وارد واکنش شود، به صورت آزاد در محصول نهایی باقی می‌ماند. در واقع می‌توان گفت در حالیکه ناخالصی‌های سیلیسی بیشتر تمایل به واکنش با اکسید منیزیم دارند، ناخالصی‌های آهکی تمایل به ترکیب شدن با دیگر ناخالصی‌ها همچون سیلیس، هماتیت و آلومینا دارند. لذا دستیابی به اکسید منیزیم خالص در حضور ناخالصی‌های آهکی با سهولت بیشتری امکان پذیر است.



شکل ۷ درصد وزنی محصولات فرایند تف‌جوشی در دمای □ ۱۹۰۰ بر حسب درصد وزنی CaO در سنگ معدن اولیه



شکل ۸ مقادیر گرمای مصرفی و خلوص MgO تولیدی در فرایند تف‌جوشی در دمای □ ۱۹۰۰ بر حسب درصد وزنی CaO در سنگ معدن اولیه

شکل (۸) گرمای مصرفی در فرایند تف‌جوشی نمونه‌های ۷–۲۱ از دمای محیط تا دمای ° ۱۹۰۰ را به نمایش گذاشته است. محور عمودی سمت راست در شکل (۷) مقادیر وزنی MgO در محصول نهایی فرایند تف‌جوشی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل بیش‌ترین خلوص MgO در محصول نهایی برای نمونه‌ای با ۱۰درصد وزنی آهک و ۴٪ سیلیس به دست می آید. افزایش بیشتر آهک تنها باعث اتلاف حرارتی فرایند تف‌جوشی شده و تاثیر مثبتی نخواهد داشت. لذا می توان گفت بهترین ترکیب از CaO,SiO2 در سنگ معدن ترکیبی است که شامل ۹ درصد وزنی آهک و ۵ درصدوزنی سیلیس است. در این ترکیب در عین اینکه خلوص MgO در محصول نهایی مقدار مناسبی است (۸۴٫۵٪)، تلفات حرارتی نیز از مقدار پایینی برخوردار است. بر همین اساس ترکیب بهینه از سنگ معدن منیزیت می‌تواند ترکیبی با نسبت CaO/SiO_2 معادل ۱٫۸ باشد. لذا می‌توان پیشنهاد کرد در ترکیباتی که این نسبت کمتر از ۱٫۸ است مقداری آهک یا کلسیت به سیستم افزوده شود تا بتواند با سیلیس وارد واکنش شده و با تشکیل فاز Ca_2SiO_4 مانع از واکنش سیلیس با منیزیت و تشکیل فاز فورستریت گردد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرایند کلسیناسیون و تف‌جوشی نمونه‌های مختلفی از سنگ معدن منیزیا با مقادیر مختلف از ناخالصی‌ها، از منظر ترمودینامیکی به کمک نرم افزار FactSage 6.1 مدل‌سازی گردید. مطالعات نشان می‌دهد، حضور ناخالصی‌ها باعث کاهش مصرف حرارت در کوره طی فرایندهای کلسیناسیون و تف‌جوشی می‌شود. این حقیقت ناشی از آنتالپی گرمایش پایین‌تر ناخالصی‌هایی مثل سیلیس و آهک در مقایسه با منیزیا است. افزایش محتوای ناخالصی سیلیسی در سنگ معدن منجر به تشکیل فاز مذاب خالـــص $SiO_2.2MgO$ می‌شود که با کسب گرمای نهان ذوب خود از کوره، باعث ایجاد تلفات حرارتی می‌شود. مقادیر وزنی نسبتا پایین ناخالصی‌ها مانع از تشکیل فازهای مذاب سرباره‌ای در طول فرایند تفجوشی شده است. بهترین ترکیب سنگ معدن که کمترین مصرف انرژی در فرایند تف‌جوشی را داشته و همزمان بیشترین خلوص منیزیا را ایجاد می‌کند، دارای نسبت CaO/MgO=1.8 است. نتایج این کار تحقیقا تی نشان می‌دهد می‌توان با کنترل مقادیر نسبی برخی ناخالصی‌های مهم، مصرف انرژی را در فرایندهای پیرومتالورژی تا حدی کاهش داد. راهکارهای کنترل ترکیب می تواند شامل افزودن مقداری از یک ماده ارزان قیمت به ورودی فرایند و یا استفاده از روش های مختلف جداسازی برای کاهش برخی دیگر از انواع ناخالصی‌ها در ورودی باشد.

واژه نامه

تف‌جوشی	Sintering
منیزیت	Magnesite
مروینیت	Merwinite
فورستریت	Forsterite
مانتیسلایت	Monticellite

تقدیر و تشکر

با تشکر از دانشگاه صنعتی امیرکبیر که نرم افزار FactSage را در اختیار نویسنده مقاله قرار داده اند.

مراجع

[1] M. Chinthala, A. Balakrishnan, P. Venkataraman, V. M. Gowtham, and R. K. Polagani, “Synthesis and applications of nano-MgO and composites for medicine, energy, and environmental remediation: A review,” *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, no. 6, pp. 4415–4454, 2021. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01299-4

[2] L. Ai, H. Yue, and J. Jiang, “Sacrificial template-directed synthesis of mesoporous manganese oxide architectures with superior performance for organic dye adsorption,” *Nanoscale*, vol. 4, pp. 5401–5408, 2012. https://doi.org/10.1039/c2nr31333b

[3] M. J. Akhtar, M. Ahamed, H. A. Alhadlaq, and S. A. Alrokayan, “MgO nanoparticles cytotoxicity caused primarily by GSH depletion in human lung epithelial cells,” *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, vol. 50, pp. 283–290, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.07.016

[4] T. Amani, M. Haghighi, B. Rahmanivahid, “Microwave-assisted combustion design of magnetic Mg–Fe spinel for MgO-based nanocatalyst used in biodiesel production: influence of heating-approach and fuel ratio,” *Journal of Industrial Engineering Chemistry*, vol. 80, pp. 43–52, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.07.029

[5] A. Chowdhury, M. Rasul, and M. M. Kamal Khan, “Thermodynamic processes and characterization of dead burned magnesia: A review,” in Proc. 5th IASME/WSEAS Int. Conf. Energy & Environment, 2010, pp. 344–349. https://doi.org/10.5555/1807906.1807972

[6] M. Fernandes, K. R. B. Singh, T. Sarkar, P. Singh, R. P. Singh, “Recent Applications of Magnesium Oxide (MgO) Nanoparticles in various domains,” *Advanced Materials Letters*, vol. 11, no. 8, pp. 1-10, 2020. https://doi.org/10.5185/amlett.2020.081543

[7] G. Balakrishnan, R. Velavan, K. Mujasam Batoo, E. H. Raslan, “Microstructure, optical and photocatalytic properties of MgO nanoparticles,” *Results in Physics*, vol. 16, p. 103013, 2020. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103013

[8] J. Nobre, H. Ahmed, M. Bravo, L. Evangelista, and J. Brito, “Magnesia (MgO) production and characterization, and its influence on the performance of cementitious materials: A review,” *Materials*, vol. 13, p. 4752, 2020. https://doi.org/10.3390/ma13214752

[9] R.V. Filkoski, I. J. Petrovski, Z. Gjurchinovski, “Energy optimization of vertical shaft kiln operation in the process of dolomite calcination,” *Thermal Science*, vol. 22, no. 5, pp. 2123-2135, 2018. https://doi.org/10.2298/TSCI180125278F

[10] A. Agrawal and P. S. Ghoshdastidar, “Numerical simulation of heat transfer during production of rutile titanium dioxide in a rotary kiln,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 106, pp. 263–279, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.024

[11] M. R. Saeri, S. Otroj, and Z. A. Nemati, “Study of corrosion behavior of $MgO–Cr_2O_3$ refractories under the influence of cement clinker,” *Journal of Metallurgy and Materials Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 73–81, 2010.

[12] M. Cosic, B. Pavlovski, and E. Tkalcec, “Activated sintering of magnesium oxide derived from serpentine,” *Science of Sintering*, vol. 21, no. 3, pp. 161–174, 1989.

[13] P. Wu, G. Eriksson, A. D. Pelton, and M. Blander, “Prediction of the thermodynamic properties and phase diagrams of silicate systems,” *ISIJ International*, vol. 33, no. 1, pp. 26–35, 1993. https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.26

[14] G. M. Bimpilas and G. N. Anastassakis, “Magnesite beneficiation methods: A review,” *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal*, vol. 1, pp. 14–20, 2020. https://doi.org/10.58903/a14161822

[15] A. Agrawal and P. S. Ghoshdastidar, “Numerical simulation of heat transfer during production of rutile titanium dioxide in a rotary kiln,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 106, pp. 263–279, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.024

[16] L. Fu, J. Yue, W. Liu, Z. Han, D. Bai, and G. Xu, “Analysis and experiment of sintering and densification of magnesia

particles," *Chemical Engineering Science*, vol. 268, p. 118396, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118396

[17] Z. Yu, Z. Guo, L. Wang, Z. Li, X. Han, and W. Sun, "An eco-friendly approach to purify natural magnesite and to densify sintered magnesia," *Open Ceramics*, vol. 17, p. 100549, 2024. https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100549

[18] Y. Attou, B. Mohamed, and A. Feddal, "Numerical analysis of turbulent flow and heat transfer enhancement using V-shaped grooves mounted on the rotary kiln's outer walls," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 350–359, 2023. https://doi.org/10.18186/thermal.1448621

[19] J. P. Singh, V. Singh, A. Sharma, G. Pandey, K. H. Chae, and S. Lee, "Approaches to synthesize MgO nanostructures for diverse applications," *Heliyon*, vol. 6, no. 9, p. e04882, 2020. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04882

[20] K. V. Fayruzov, I. D. Kashcheev, K. G. Zemlyanoi, and E. F. Chaika, "Investigation of calcined magnesite sintering," *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 63, no. 2, pp. 226–229, 2022. https://doi.org/10.1007/s11148-022-00711-y

[21] S. Aslani, H. R. Samim Bani Hashemi, and F. Arianpour, "Beneficiation of Iranian magnesite ores by reverse flotation process and its effects on shaped and unshaped refractories properties," *Bulletin of Materials Science*, vol. 33, pp. 697–705, 2010. https://doi.org/10.1007/s12034-011-0150-0

[22] U. Tulyaganov, K. Dimitriadis, S. Agathopoulos, F. Baino, and R. Fernandes, "Wollastonite-containing glass-ceramics from the CaO–Al_2O_3–SiO_2 and CaO–MgO–SiO_2 ternary systems," *Open Ceramics*, vol. 17, p. 100507, 2024. https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100507

[23] S. Sembiring, A. Riyanto, W. Simanjuntak, and R. Situmeang, "Effect of MgO–SiO_2 ratio on the forsterite (Mg_2SiO_4) precursors characteristics derived from amorphous rice husk silica," *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 33, no. 4, pp. 1828–1836, 2017. http://dx.doi.org/10.13005/ojc/330427

[24] K. Laziri, A. Djemli, D. Redaoui, F. Sahnoune, E. Dhahri, S. F. Hassan, and N. Saheb, "Kinetics of formation, microstructure, and properties of monolithic forsterite (Mg_2SiO_4) produced through solid-state reaction of nano-powders of MgO and SiO_2," *Ceramics International*, vol. 50, pp. 45179–45188, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.357

[25] K. Kalaitzidou, E. Pagona, P. Stratigousis, X. Ntampou, V. Zaspalis, A. Zouboulis, and M. Mitrakas, "Hematite nanoparticles addition to serpentine/pyroxenes by-products of magnesite mining enrichment process for the production of refractories," *Applied Sciences*, vol. 12, p. 2094, 2022. https://doi.org/10.3390/app12042094

[26] R. Zhang, Z. Liu, and J. Yu, "Removal of silicon from magnesite by flotation: Influence of particle size and mechanical mechanism," *Materials*, vol. 16, p. 6095, 2023. https://doi.org/10.3390/ma16186095

[27] E. Pagona, K. Kalaitzidou, A. Zouboulis, and M. Mitrakas, "Effects of additives on the physical properties of magnesite ore mining by-products for the production of refractories," *Minerals Engineering*, vol. 174, p. 107247, 2021. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107247